

## АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИРКОНА С МИКРОНЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ КАК ОСНОВА ДЛЯ ПЕТРОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ПОСТРОЕНИЙ

Замятин Д.А.<sup>1,2</sup>, Вотяков С.Л.<sup>1,2</sup>, Щапова Ю.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и геохимии имени акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Уральский Федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, zamiatin@igg.uran.ru

Для зерен циркона, типичного акцессорного минерала-геохронометра магматических, метаморфических и осадочных пород, достаточно часто характерна полигенность и полихронность строения. Текстура и зональность подобных зерен представляют собой основу для петрохронологических построений - анализа информации о стадийности образования и преобразования циркона, сопоставления физических условий и процессов, при которых происходило формирование минерала (горной породы), со временем его формирования [Corfu et al., 2003; Engi et al., 2017]. Последнее требует анализа комплекса данных, полученных различными методиками, в первую очередь локальными, о вещественных особенностях различных текстурных зон цирконов. В условиях разнообразия методов и ограниченного числа зерен циркона необходимо корректное планирование последовательности применения различных методик исследования. Использование разрушающих методов анализа возможно лишь на завершающих стадиях после комплексного материаловедческого исследования и получения данных, в том числе позволяющих обоснованно выбирать фрагменты (зоны) зерен для LA-ICP-MS (ID-TIMS) исследования, а в последующем корректно соотносить изотопный состав с зоной минерала, геологическими процессами и физическими условиями его образования. Актуальна разработка алгоритмов и подходов комплексного локального исследования полигенных и полихронных цирконов для решения задач гео- и петрохронологии. Основу последних составляют методы физики твердого тела – рамановская и люминесцентная спектроскопия, метод дифракции отраженных электронов, а также химические и изотопные методы - EPMA, LA-ICP-MS, SIMS, TIMS и др. [Engi et al., 2017; Williams et al., 2017].

**Цель работы** – отработка и апробация комплексного подхода (алгоритма) для изучения состава зерен циркона, их текстуры и структурного состояния с микронным пространственным разрешением с использованием приборной базы и методик ЦКП УрО РАН «Геоаналитик» как основы для петрохронологических построений.

**Оборудование:** электронно-зондовый микроанализатор Cameca SX100, рамановский спектрометр Horiba LabRam HR800 Evolution (лазерные линии 488, 514, 633 нм), сканирующий электронный микроскоп Jeol JSM-6390LV с приставкой дифракции отраженных электронов EBSD NordlysNano, масс-спектрометр с индуктивной плазмой NexION 300s с приставкой для лазерной абляции NWR213.

**Образцы:** серия цирконов из ряда геологических объектов - пегматитов Шарташского и Адуйского массивов, Средний Урал (пробы Zrc-67 и Ad1), метаморфитов Талдыкского блока, Мугоджары (K1098), кимберлитов, Якутия (M1), гранулитов, Богемский массив, Чехия (проба Plesovice), карбонатитов, Австралия (Mud Tank), сиенитов, озеро Куэл, Онтарио, Канада (91500), россыпей, округ Ban Lung, провинция Ratanakiri, Камбоджа (Ratanakiri).

**Результаты.** Алгоритм исследования зерен циркона (рис. 1) включает регистрацию BSE- и CL-изображений, анализ текстуры циркона, выделения зон и минеральных включений с применением JPD-методики [Вотяков и др., 2014]; количественный анализ по зонам катионного и анионного состава, в том числе содержания U, Th, Pb и воды; элементное картирование зерен; регистрацию и анализ формы линии  $Si K_{\beta}$ ; регистрацию рамановских (люминесцентных) спектров и картирование зерен по параметрам рамановской линии  $\nu_3(SiO_4)$  и люминесцентной линии примесных ионов  $Dy^{3+}$ ; специальную пробоподготовку и получение ориентационных (фазовых) карт с использованием метода дифракции отраженных электронов; химическое микрозондовое U-Th-Pb и изотопное U-Pb-датирование для каждой из выделенных зон циркона с оценкой средневзвешенного значения по возрастным гистограммам и изохронным построениям.

Предложенный методический подход апробирован на серии проб циркона, представляющих широкий диапазон свойств по условиям образования (магматические и метаморфические разности), по возрасту (от триаса до протерозоя), по размеру и типу текстур, степени разупорядочения структуры (от кристаллических до полностью аморфных, метамиктных),

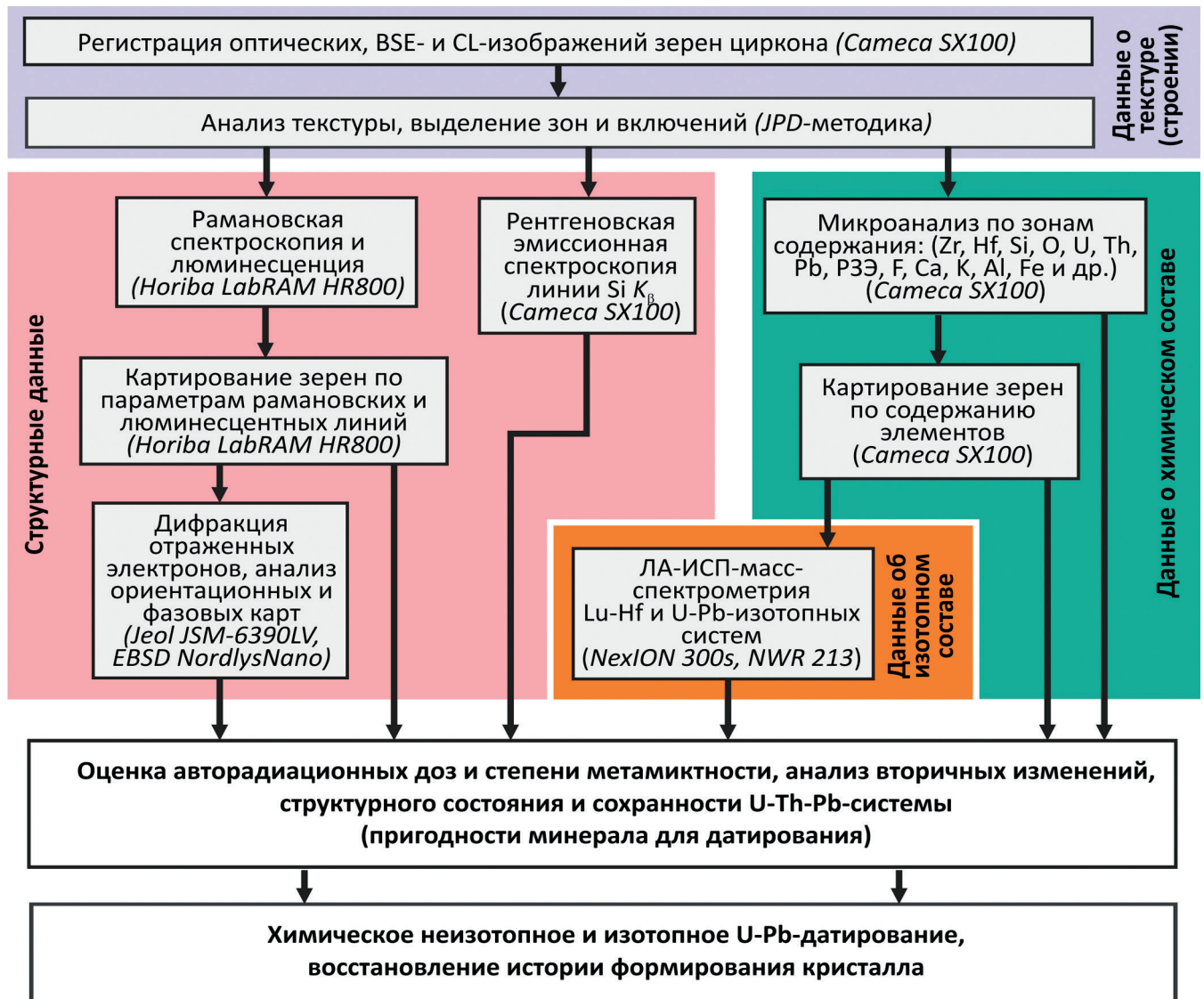


Рис. 1. Алгоритм комплексного исследования циркона локальными методами

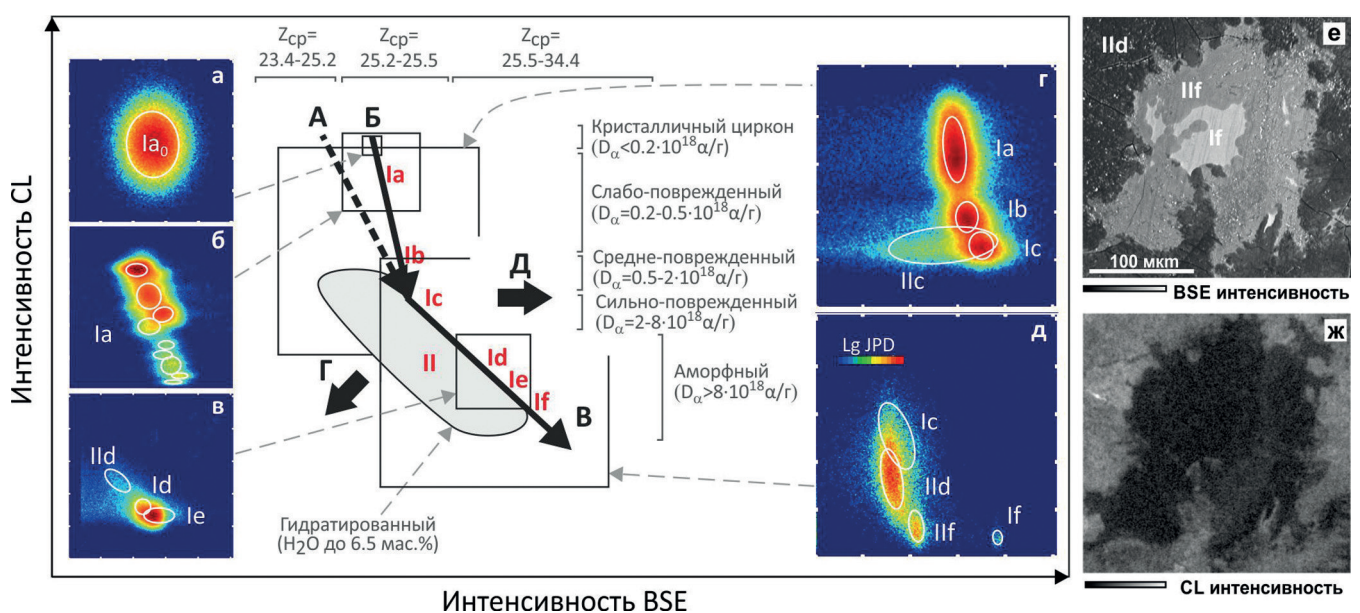


Рис. 2. Обобщенная диаграмма BSE vs. CL с JPD-гистограммами циркона M1 (а), МТ (б), Zrc-67 (в), K1098 (г), Ad1(д); BSE (е) и CL (ж) участка Ad1. Тренды изменения BSE-, CL-интенсивности: А(Б)→В – радиационное разупорядочение структуры; Г – гидратация, увеличение пористости, уменьшение среднего атомного номера ( $Z_{ср}$ ); Д – увеличение  $Z_{ср}$ . А, Б – ориентация оси с кристалла вдоль пучка электронов и перпендикулярно; Иа-Иф – слабо-, средне-, сильно-поврежденные и аморфные цирконы; И – гидратированные

по содержанию U (от 0.01 до 11.4 мас.%),  $H_2O$  (от 0 до 7.8 мас.%), Hf (от 0.9 до 10.3 мас.%) и др. На рис. 2 представлены JPD-гистограммы, полученные для BSE- и CL-изображений исследованной серии проб циркона; продемонстрировано, что BSE- и CL-интенсивности определяются не только химическим составом (средним атомным номером  $Z_{cp}$ ) и концентрацией центров люминесценции, но и структурным состоянием минерала. Проанализирован вопрос влияния вторичных процессов (диффузионно-реакционного и растворения-осаждения) на химический состав, структурное состояние, спектроскопические характеристики и U-Th-Pb-систему циркона. На примере цирконов Zrc-67 и Ad1 (рис. 2 е, ж) показано, что повышенная концентрация  $H_2O$  (до единиц мас.%) и образование молекулярных  $UO_2^{2+}$ -группировок являются признаками вторичного преобразования высокоуранового циркона и могут использоваться в качестве критерия нарушения их U-Th-Pb-системы под действием водного флюида. Выполнено химическое датирование «молодых» (нижний триас) зерен циркона, согласующееся с данными изотопных методов; продемонстрировано, что анализ метамиктного состояния циркона и замкнутости его U-Th-Pb-системы по кристаллохимическим и спектроскопическим данным является необходимым этапом его микрозондового неизотопного датирования.

*Работа выполнена в ЦКП УрО РАН «Геоаналитик» при финансовой поддержке проекта Президиума УрО РАН №18-5-5-54, гранта РФФИ №17-05-00618\17.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вотяков С.Л., Замятин Д.А., Щапова Ю.В., Поротников А.В., Краснобаев А.А. Особенности метамиктного состояния цирконов на основе анализа их микроскопических изображений и данных электронно-зондового микроанализа // Докл. РАН. 2014. Т. 457. № 3. С. 332-336.
2. Замятин Д.А. Кристаллохимия и спектроскопия циркона в решении вопросов его микрозондового химического U-Th-Pb-датирования. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2017. С.26.
3. Corfu F., Hanchar J.M., Hoskin P.W.O., Kinny P. Atlas of zircon textures // Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Eds. Hanchar J.M., Hoskin P.W.O. Washington: The Mineralogical Society of America, 2003. V. 53. P. 469–500.
4. Engi M., Lanari P., Kohn M.J. Significant Ages - An Introduction to Petrochronology // Petrochronology: Methods and Applications. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Eds. Kohn M.J., Engi M., Lanari P. Washington: The Mineralogical Society of America, 2017. V.83. P.1–12.
5. Williams M.L., Jercinovic M.J., Mahan K.H., Dumond G. Electron Microprobe Petrochronology. // Petrochronology: Methods and Applications. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Eds. Kohn M.J., Engi M., Lanari P. Washington: The Mineralogical Society of America, 2017. V.83. P.153–182.